

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i3.1348>

## **Desempeño de *Cyperus papyrus* en un Humedal Artificial Subsuficial de Flujo Horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas**

*Performance of *Cyperus papyrus* in a Subsurface Horizontal Flow Constructed Wetland for the Treatment of Domestic Wastewater*

**Elmer Eliseo Genebrozo Palhua**

[elmereliseogenebrozopalhua@gmail.com](mailto:elmereliseogenebrozopalhua@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0004-1860-343X>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima -Perú

*Artículo recibido: 18 julio 2025 - Aceptado para publicación: 28 agosto 2025*

*Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.*

### **RESUMEN**

La depuración de las aguas residuales es esencial para preservar los recursos hídricos y proteger la salud pública. En este contexto, los humedales artificiales se han consolidado como una alternativa sostenible, económica y eficaz para el tratamiento de aguas contaminadas. El presente estudio analizó el desempeño del papiro (*Cyperus papyrus*) en un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal destinado al tratamiento de aguas residuales domésticas. Para ello, se construyeron dos humedales: uno con *Cyperus papyrus* y otro sin plantas (control). En ambos se evaluaron parámetros como pH, temperatura, demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO) y oxígeno disuelto (OD). Los resultados mostraron que, aunque no hubo diferencias significativas en pH y temperatura entre ambos sistemas, el humedal con *Cyperus papyrus* presentó mejoras notables en la remoción de contaminantes. En este caso, se alcanzó una reducción del 50% en la DBO<sub>5</sub> y del 60% en la DQO, mientras que el humedal control solo logró disminuir estos parámetros en un 34% y 32%, respectivamente. Asimismo, el oxígeno disuelto aumentó en el humedal con *Cyperus papyrus* a 2,01 mg/L, lo que representa un incremento del 32,12% respecto al control. En conclusión, los hallazgos confirman la eficiencia del *Cyperus papyrus* en la mejora de la calidad del agua tratada, consolidándose como una opción prometedora y efectiva para el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal.

*Palabras clave:* biorremediación, biofiltro, humedal artificial, agua residual doméstica, materia orgánica

## ABSTRACT

The purification of wastewater is essential to preserve water resources and protect public health. In this context, constructed wetlands have become a sustainable, cost-effective, and efficient alternative for treating contaminated water. This study analyzed the performance of papyrus (*Cyperus papyrus*) in a subsurface horizontal flow constructed wetland for the treatment of domestic wastewater. For this purpose, two wetlands were built: one with *Cyperus papyrus* and another without plants (control). In both systems, parameters such as pH, temperature, biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), chemical oxygen demand (COD), and dissolved oxygen (DO) were evaluated. The results showed that, although there were no significant differences in pH and temperature between the two systems, the wetland with *Cyperus papyrus* demonstrated notable improvements in the removal of pollutants. Specifically, it achieved a 50% reduction in BOD<sub>5</sub> and a 60% reduction in COD, while the control wetland only reduced these parameters by 34% and 32%, respectively. Additionally, dissolved oxygen increased in the wetland with *Cyperus papyrus* to 2.01 mg/L, representing a 32.12% increase compared to the control. In conclusion, the findings confirm the efficiency of *Cyperus papyrus* in improving treated water quality, consolidating it as a promising and effective option for wastewater treatment in subsurface horizontal flow constructed wetland systems.

*Keywords:* bioremediation, biofilter, artificial wetland, domestic wastewater, organic matter

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales domésticas es fundamental por su impacto en la salud y el ambiente. El vertido inadecuado puede provocar enfermedades, contaminación de fuentes de agua dulce, degradación de ecosistemas y proliferación de algas, lo que pone en riesgo tanto a las personas como a la biodiversidad (Li et al., 2020; Retta et al., 2023). En este contexto, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el ODS 6, buscan garantizar agua y saneamiento seguros para todos. Sin embargo, la falta de tratamiento dificulta su cumplimiento, aunque se estima que la depuración de aguas residuales contribuiría directamente a 11 de los 17 ODS (Khoo et al., 2023).

El consumo de agua sigue en aumento: a nivel global se ha multiplicado por seis en el último siglo y crece 1% cada año (Koul et al., 2022). Según la FAO (2021), el consumo doméstico varía entre 3 y 978 litros por persona al día, con una mediana de 149 litros. A esto se suma que cerca del 45% de las aguas residuales en el mundo no reciben tratamiento adecuado, lo que genera enfermedades vinculadas al consumo de agua contaminada (Organización Mundial de la Salud, 2022).

En el Perú, la situación también es crítica. De 202 plantas de tratamiento de aguas residuales registradas en 2021, solo 171 estaban operativas, mientras que 31 presentaban problemas de planificación o construcción (Zela & Olivas, 2022). Frente a estas limitaciones, los métodos convencionales resultan insuficientes en zonas rurales o dispersas, lo que abre espacio a tecnologías alternativas como la fitorremediación, que aprovecha la capacidad de las plantas para transformar o retener contaminantes de forma natural, económica y sin recurrir a químicos (Retta et al., 2023).

En este marco, los humedales artificiales (HA) han ganado reconocimiento internacional por imitar los procesos de los humedales naturales y ofrecer soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales (García-Ávila et al., 2019). Estos sistemas, perfeccionados con diferentes especies vegetales según el tipo de flujo (horizontal, vertical o mixto), permiten remover contaminantes como DBO, DQO y sólidos suspendidos (Retta et al., 2023; Stefanakis et al., 2014). Entre las especies más efectivas destaca *Cyperus papyrus*, cuyas raíces facilitan la fijación de microorganismos, prolongan el tiempo de residencia del agua, retienen partículas, adsorben contaminantes y aportan oxígeno en la rizosfera, lo que mejora la biodegradación (Perbangkhem & Polprasert, 2010).

Un caso concreto se observa en la empresa industrial FAMESA (Puente Piedra, Lima), donde las aguas residuales domésticas generadas en comedores, servicios higiénicos y vestuarios se utilizan para riego sin tratamiento, representando un riesgo sanitario. Ante la inviabilidad de aplicar métodos convencionales por su alto costo y limitada infraestructura, los humedales artificiales surgen como una alternativa más viable y accesible.

En este contexto, el presente estudio evalúa el desempeño de *Cyperus papyrus* en un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para la remoción de DBO y DQO, así como en la regulación de parámetros como OD, pH y temperatura. La elección de este tipo de sistema responde a su capacidad para manejar altas cargas orgánicas, evitar problemas de olores y plagas, y mantener eficiencia incluso en condiciones de bajas temperaturas (García-Ávila et al., 2019).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue de tipo aplicada, ya que buscó emplear conocimientos teóricos y prácticos para resolver un problema real: la mejora de la calidad del agua doméstica mediante un humedal artificial (Ñaupas et al., 2018). El enfoque fue cuantitativo, basado en un proceso organizado de muestreo, recolección y análisis estadístico (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). Se utilizó un diseño experimental puro, con manipulación de la variable independiente (presencia de *Cyperus papyrus*) para evaluar su efecto sobre la variable dependiente (calidad del agua), conformando un grupo control y un grupo experimental (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

El experimento se llevó a cabo con dos humedales artificiales (HA): uno de control (sin plantas) y otro de tratamiento (con *Cyperus papyrus*). En ambos sistemas se midieron parámetros de calidad de agua antes y después del tratamiento, incluyendo demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), oxígeno disuelto (OD), temperatura y pH.

La población estuvo conformada por las aguas residuales generadas en las instalaciones de la empresa FAMESA (servicios higiénicos, vestuarios y comedor), ubicada en Puente Piedra, Lima. La muestra correspondió a un caudal de 0,006 L/s de estas aguas residuales domésticas.

Para la construcción del humedal piloto, se aplicó un factor de escalonamiento del 90% para reducir área y costos, manteniendo proporciones reales. Se utilizó grava media como material filtrante y se diseñó un humedal subsuperficial de flujo horizontal con dimensiones de 1,9 m de largo, 0,42 m de ancho, 0,30 m de profundidad efectiva y pendiente del 1%. Las plantas de *Cyperus papyrus* fueron seleccionadas y adaptadas durante un mes previo a su instalación en el sistema.

El sistema funcionó durante 9 meses, con muestreos periódicos en diferentes etapas del proceso para evaluar su eficiencia. El cálculo del porcentaje de remoción de contaminantes se realizó mediante la ecuación propuesta por Patel et al. (2019):

$$\%R = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100$$

donde  $C_o$  y  $C_t$  representan las concentraciones inicial y final de DBO y DQO (mg/L).

Finalmente, los datos fueron organizados en Excel y analizados en Minitab v16. Se aplicó estadística descriptiva (promedios, valores máximos y mínimos) y análisis inferencial, evaluando la normalidad de los datos para determinar la aplicación de pruebas paramétricas (ANOVA) o no paramétricas (H-Kruskal Wallis).

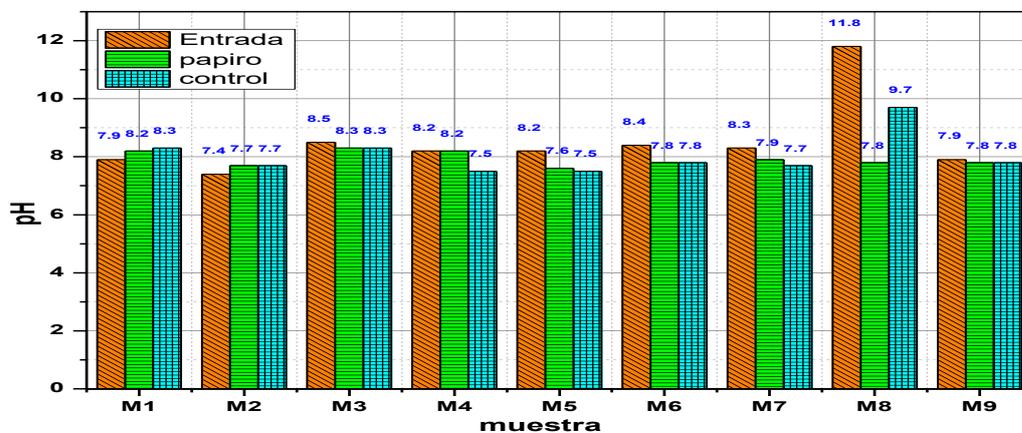
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Medición de pH

La variación de los valores de pH se muestra en la Figura 1. El pH del agua a la entrada del sistema se mantuvo en valores elevados, superiores a 7.5, alcanzando un máximo de 11.8 en la octava medición. En comparación, los valores del efluente de los humedales fueron más estables. El pH en la salida del humedal con papiro presentó un valor promedio de 7.97 a lo largo del muestreo, mientras que el humedal control mostró un promedio de 8.04, con un incremento significativo en la octava medición.

**Figura 1**

*Variación de pH*

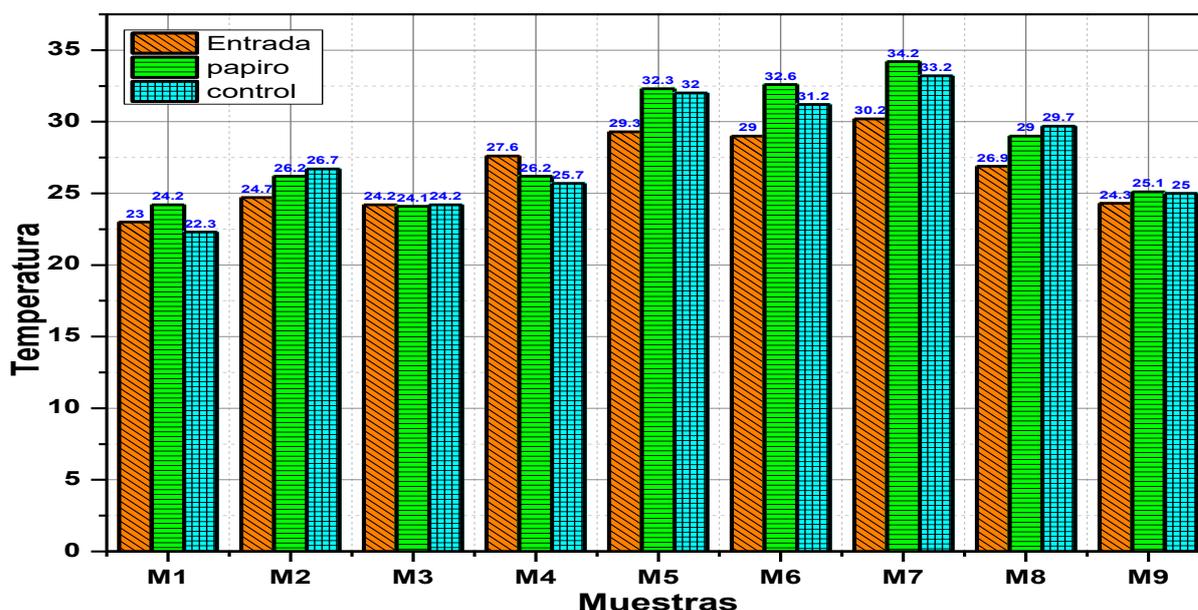


### Registro de temperatura

Los datos de temperatura registrados en el humedal muestran una tendencia a la regulación térmica del agua, con diferencias significativas entre los puntos de ingreso y salida a lo largo de los muestreos. Inicialmente, las temperaturas fueron similares en todos los puntos, pero en el cuarto muestreo se observó una reducción en el tratamiento con papiro (24.2 °C) y en el control (24.2 °C) en comparación con el ingreso (27.6 °C). Durante los meses más cálidos, las temperaturas aumentaron, alcanzando un máximo en el séptimo muestreo con 34.2 °C en el tratamiento con papiro y 32.6 °C en el control, influenciado por la temperatura ambiental. Posteriormente, las temperaturas disminuyeron en los últimos muestreos. Estos resultados sugieren que el humedal, especialmente el tratamiento con papiro, contribuye a la regulación térmica del agua, reduciendo el impacto de las fluctuaciones térmicas en el ecosistema acuático.

**Figura 2**

*Valores de temperatura*

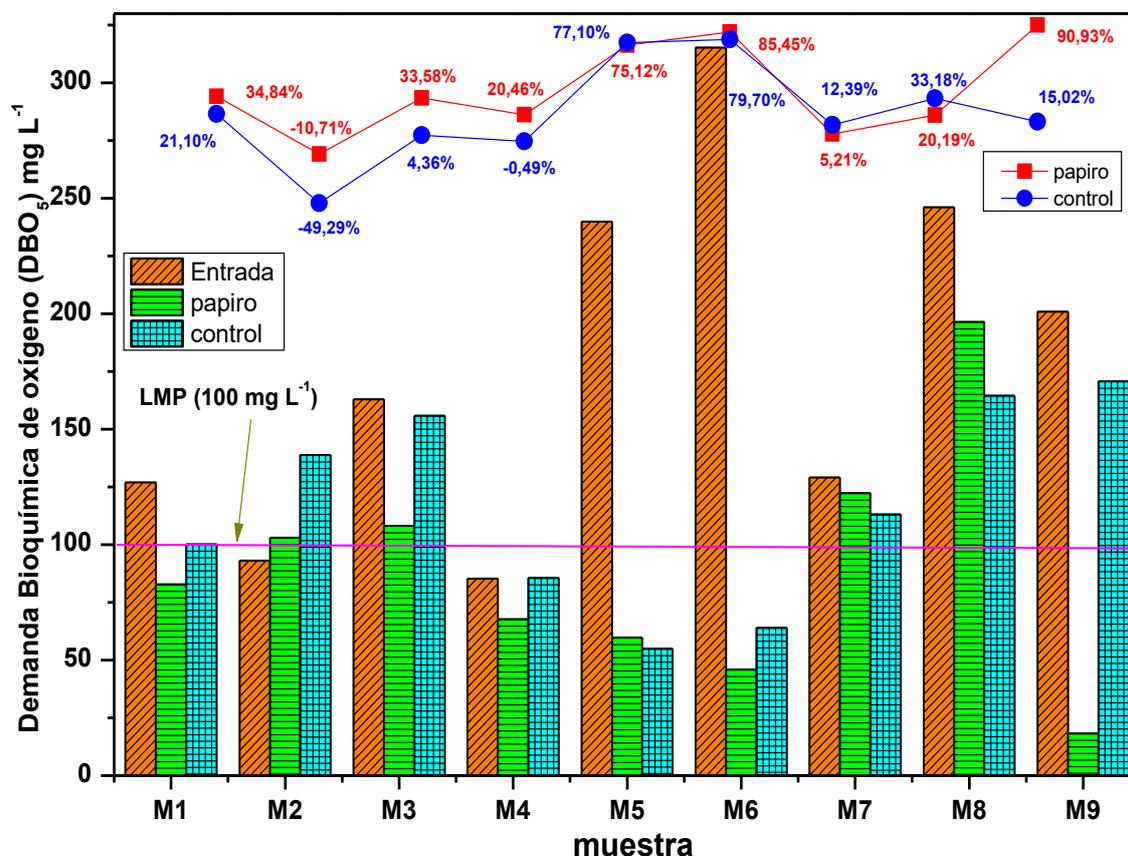


### **Análisis de demanda bioquímica de oxígeno**

En la Figura 3, se muestra de manera gráfica la reducción de la DBO<sub>5</sub> a lo largo de los nueve muestreos. En general, se observa una tendencia decreciente en la concentración de DBO<sub>5</sub> en los humedales con papiro y control, con excepción del segundo muestreo, donde los valores superaron a los registrados en el ingreso. En los muestreos M1, M4, M5, M6 y M9, las concentraciones del efluente del humedal con papiro se situaron por debajo del LMP de descarga de PTAR, establecido en 100 mg/L. En el caso del humedal control, solo en los muestreos M4, M5 y M6 se registraron valores por debajo de dicho límite. Las concentraciones más elevadas de DBO<sub>5</sub> en el agua de entrada se presentaron en los muestreos M5, M6 y M8, con valores de 240,0 mg/L, 315,3 mg/L y 246,2 mg/L, respectivamente. Sin embargo, en los muestreos M5 y M6, el humedal con papiro logró los mayores porcentajes de remoción de este parámetro, alcanzando 75,12% y 85,45%, respectivamente. Por otro lado, los valores más bajos en el ingreso al humedal se registraron en los muestreos M2 y M4, con concentraciones de 93,0 mg/L y 85,2 mg/L, respectivamente. Finalmente, en el muestreo M9, el efluente del humedal con papiro alcanzó la máxima eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub>, con un 90,93%.

**Figura 3**

Concentración de  $DBO_5$  y porcentajes de remoción

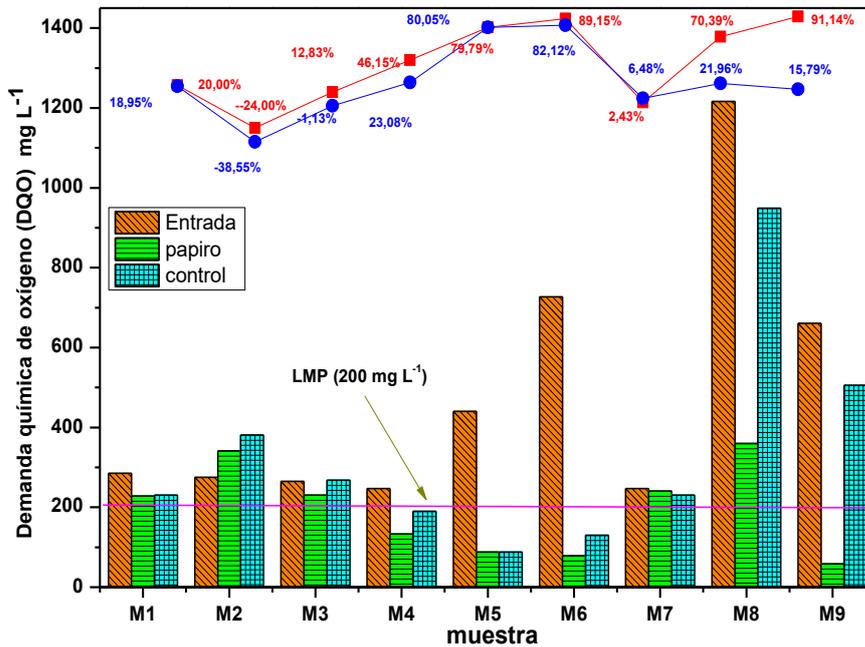


### Análisis de demanda química de oxígeno

En la Figura 4, se muestra la remoción de DQO en los diferentes muestreos. En los muestreos M1, M2, M3, M7 y M8, no se evidenció una reducción significativa de la DQO en el humedal con papiro, mientras que en el humedal control, esta tendencia se observó en los muestreos M1, M2, M3, M7, M8 y M9. En contraste, en los muestreos M4, M5, M6 y M9, los valores del efluente del humedal con papiro estuvieron por debajo del LMP de 200 mg/L, mientras que en el humedal control solo los muestreos M4, M5 y M6 cumplieron con este límite. Las concentraciones más altas de DQO en el agua de entrada se registraron en los muestreos M6, M8 y M9, con valores de 727,0 mg/L, 1216,0 mg/L y 660,5 mg/L, respectivamente. Sin embargo, en los muestreos M5, M6 y M9, el humedal con papiro alcanzó los mayores porcentajes de remoción de este parámetro, con eficiencias de 79,79 %, 89,15 % y 91,14 %, respectivamente. Por otro lado, en los muestreos M2, M3 y M7, la remoción de DQO fue mínima, e incluso en el segundo muestreo, los valores en el efluente del humedal con papiro y del control fueron superiores a los registrados en el ingreso.

**Figura 4**

*Concentración de DQO y porcentajes de remoción*

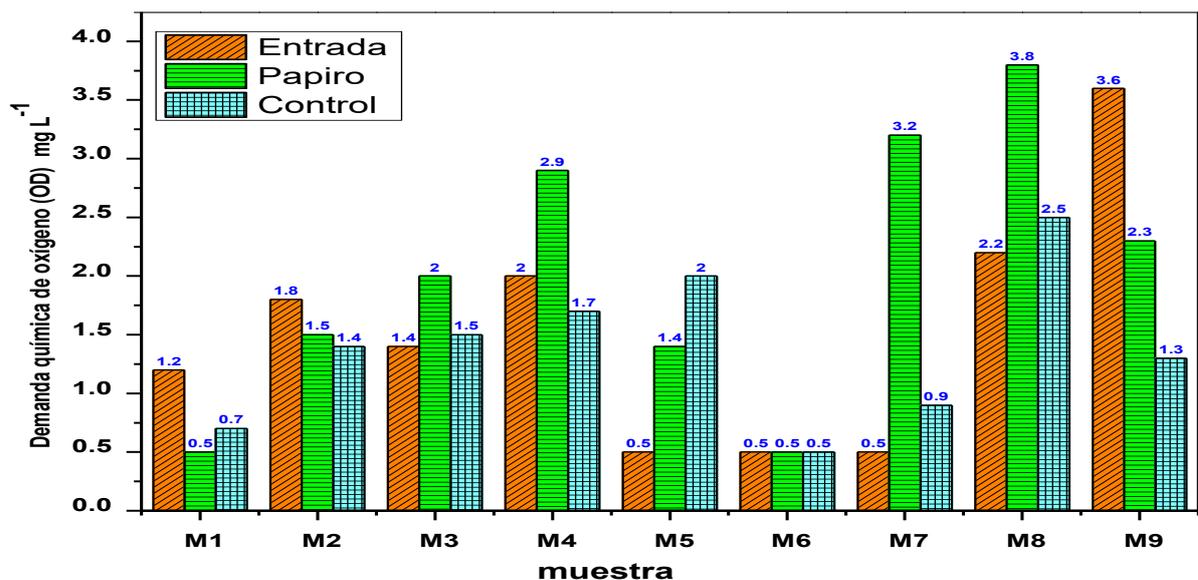


**Análisis de oxígeno disuelto (OD)**

La Figura 5 muestra los niveles de OD en los diferentes puntos de muestreo. El afluente al HA presenta un valor promedio de 1,52 mg/L. Se observa un incremento en los niveles de OD en los efluentes de ambos humedales, alcanzando 2,01 mg/L en el humedal con papiro y 1,39 mg/L en el humedal control, lo que indica una mejora en la oxigenación del agua tras su paso por el sistema de tratamiento.

**Figura 5**

*Concentración de OD*



## Prueba de Hipótesis

Solo la concentración de DBO presenta una distribución normal al ingreso, humedal control y papiro del HA, por lo que se emplea estadística paramétrica, específicamente ANOVA. En el resto de los parámetros, al menos uno de los valores no sigue una distribución normal, lo que justifica el uso de estadística no paramétrica, aplicándose la prueba de Kruskal-Wallis.

**Tabla 1**

*Test de normalidad con test de Shapiro-Wilk*

parámetro		Estadístico	gl	Sig.
pH	entrada	0,653	9	0,000
	papiro	0,925	9	0,431
	control	0,741	9	0,004
Temperatura	entrada	0,921	9	0,402
	papiro	0,814	9	0,030
	control	0,939	9	0,572
DQO	entrada	0,772	9	0,010
	papiro	0,909	9	0,308
	control	0,804	9	0,023
DBO	entrada	0,939	9	0,572
	papiro	0,949	9	0,684
	control	0,929	9	0,476
OD	entrada	0,819	9	0,034
	papiro	0,390	9	0,000
	control	0,505	9	0,000

### Para pH y temperatura

La Tabla 2 la Figura 6 y 7, presentan el análisis de la variación del pH y la temperatura en los diferentes puntos de muestreo del humedal artificial. Según la prueba de Kruskal-Wallis, no se encontraron diferencias significativas en los valores de pH ( $p = 0,190 > 0,05$ ) ni en la temperatura ( $p = 0,718 > 0,05$ ) entre la entrada, el efluente del humedal con *Cyperus papyrus* y el humedal control. La figura 7, representada por un diagrama de cajas y bigotes, muestra que la dispersión de los datos de pH fue similar en todas las categorías, con una mediana más alto en la entrada (8,53), seguido por la salida del humedal control (8,04) y el menor valor en la salida del humedal con *Cyperus papyrus* (7,97), donde se observó una distribución asimétrica positiva. En cuanto a la temperatura, la figura evidencia una mayor variabilidad en la salida del humedal con papiro, seguida del control y la entrada, con medianas de 28,21°C, 27,78°C y 26,58°C, respectivamente. En general, los resultados indican que el proceso de tratamiento no generó cambios significativos en el pH, manteniéndose estable a lo largo del sistema, mientras que la

temperatura presentó ligeras variaciones sin diferencias significativas entre las condiciones evaluadas.

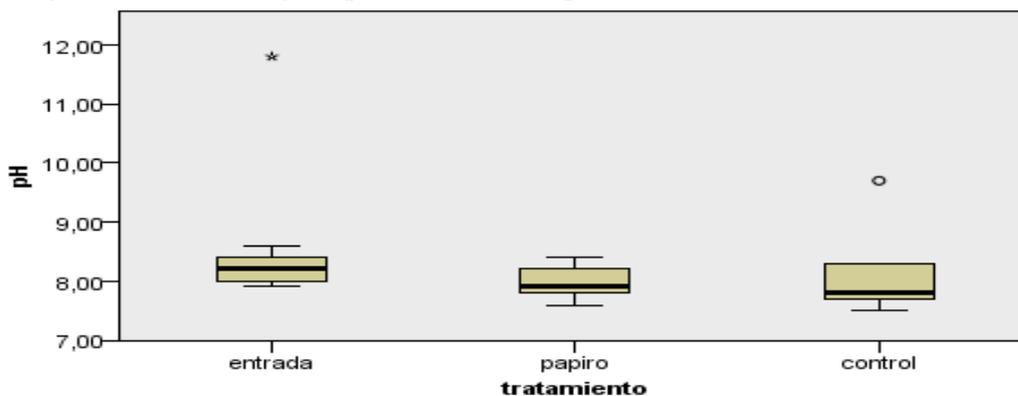
**Tabla 2**

*Prueba de Kruskal – Wallis para variación de pH y temperatura*

	pH	Temperatura
H de Kruskal	3,321	0,663
gl	2	2
Sig. asin	0,190	0,718

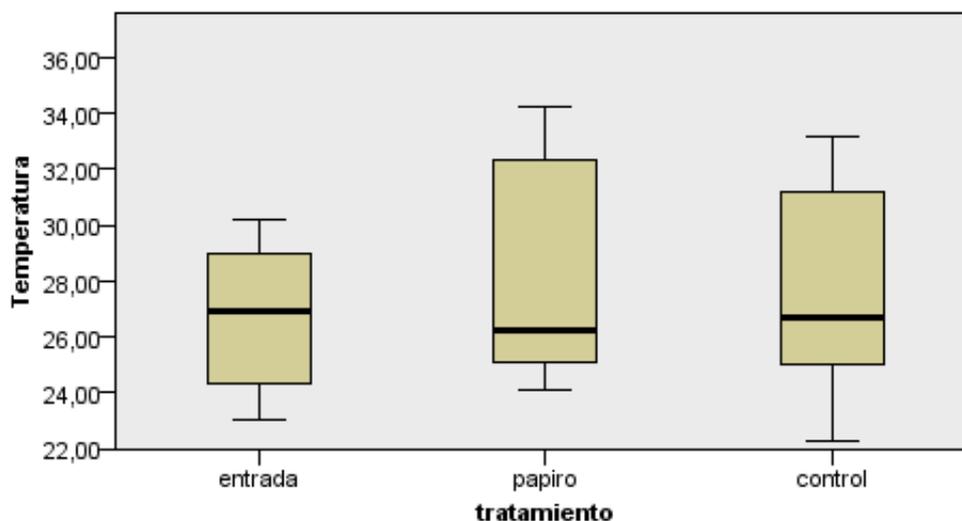
**Figura 6**

*Diagrama de cajas y bigotes para variación de pH*



**Figura 7**

*Diagrama de cajas y bigotes para variación de temperatura en tratamiento*



### Comparación de resultados con estándares de calidad ambiental

La Tabla 3 resume los resultados del tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales y su comparación con los Límites Máximos Permisibles (LMP) para riego. Se evaluaron pH, temperatura, DBO<sub>5</sub>, DQO y OD en tres puntos: entrada, salida del humedal con *Cyperus papyrus* y salida del humedal control.

Los resultados muestran que solo el humedal con *Cyperus papyrus* cumplió con los valores establecidos en los LMP. El pH se mantuvo dentro del rango permitido (6,5 – 8,5) tanto en el efluente con papiro (7,97) como en el control (8,03). La temperatura también fue adecuada, con valores por debajo de 35°C en ambos casos. En cuanto a la DBO<sub>5</sub>, el humedal con papiro redujo la concentración de 177,73 a 89,37 mg/L, cumpliendo con el límite de 100 mg/L, mientras que el control alcanzó 116,43 mg/L, excediendo lo permitido. Algo similar ocurrió con la DQO: el humedal con papiro disminuyó de 484,72 a 195,51 mg/L (dentro del límite de 200 mg/L), mientras que el control llegó a 330,42 mg/L, por encima del valor permitido. Finalmente, el oxígeno disuelto aumentó en el humedal con papiro (2,01 mg/L) y disminuyó en el control (1,39 mg/L), aunque este parámetro no tiene un límite establecido.

En síntesis, el humedal con *Cyperus papyrus* fue el único que logró mejorar de manera efectiva la calidad del agua, cumpliendo con los estándares de DBO<sub>5</sub> y DQO, mientras que el humedal control no alcanzó los niveles requeridos.

**Tabla 3**  
*Promedio de los resultados y comparación con LMP*

Parámetro	Unidades	Media aritmética			LMP	
		Ingreso	Papiro	Control	Agua para riego	Observación
pH	pH	8,53	7,97	8,03	6,5-8,5	Cumple
Temperatura	°C	26,58	27,77	28,21	< 35	Cumple
DBO <sub>5</sub>	mg L <sup>-1</sup>	177,73	89,37	116,43	100	Cumple
DQO	mg L <sup>-1</sup>	484,72	195,51	330,42	200	Cumple
OD	mg L <sup>-1</sup>	1,52	2,01	1,39	-	No existe

## DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el humedal con *Cyperus papyrus* contribuyó a estabilizar el pH (7,97) y la temperatura (27,77°C), manteniéndolos dentro de los rangos óptimos para la actividad microbiana, aunque sin diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ ). Este comportamiento coincide con estudios que señalan cómo las macrófitas regulan el pH y la temperatura mediante procesos de mineralización, absorción de nutrientes y fotosíntesis (Coleman et al., 2001; Hussein & Scholz, 2017; García-Ávila et al., 2019; Khan et al., 2020; Vymazal, 2019; Effendi et al., 2020).

En cuanto a la carga orgánica, el humedal con *Cyperus papyrus* mostró mayor eficiencia que el control, logrando una reducción del 50% en DBO<sub>5</sub> (89,37 mg/L) y del 60% en DQO (195,51 mg/L), mientras que el control no alcanzó los Límites Máximos Permisibles (LMP). Además, se observó un incremento en el oxígeno disuelto (2,01 mg/L), lo que favorece la depuración del agua. Estos resultados coinciden con investigaciones que destacan la capacidad de los humedales

vegetados para remover contaminantes y mejorar la oxigenación (Zidan et al., 2015; Dadban Shahamat et al., 2018; García-Ávila et al., 2019; Khan et al., 2020; Effendi et al., 2020).

Finalmente, solo el humedal con *Cyperus papyrus* cumplió con los estándares de calidad ambiental para efluentes tratados, en concordancia con estudios que reconocen a los humedales construidos como tecnologías verdes eficaces, sostenibles y de bajo impacto para el tratamiento de aguas residuales (Nuamah et al., 2020; Kataki et al., 2021). En conjunto, los hallazgos reafirman que *Cyperus papyrus* es una alternativa efectiva para mejorar la calidad del agua, consolidando su utilidad en la reducción de DBO<sub>5</sub>, DQO y en la estabilización de parámetros físicoquímicos.

## CONCLUSIONES

El humedal artificial con *Cyperus papyrus* demostró ser una solución muy efectiva para tratar aguas residuales domésticas. A diferencia del humedal control, este sistema logró reducir de manera notable la materia orgánica: un 50% en la DBO<sub>5</sub> y un 60% en la DQO, alcanzando los estándares exigidos por la normativa. El humedal control, en cambio, no consiguió cumplir con estos límites.

Además, el *Cyperus papyrus* ayudó a mantener estables parámetros como el pH y la temperatura, creando un ambiente más favorable para los procesos biológicos. Otro aspecto clave fue el aumento del oxígeno disuelto en el agua tratada, lo que potencia la actividad de los microorganismos encargados de la depuración.

Estos resultados confirman lo que ya habían señalado otros estudios: el *Cyperus papyrus* no solo es eficiente, sino también una alternativa sostenible y económica frente a tecnologías más costosas. En pocas palabras, se trata de una opción prometedora para mejorar la calidad del agua y proteger el medio ambiente de forma práctica y accesible.

## REFERENCIAS

- Coleman, J., Hench, K., Garbutt, K., Sexstone, A., Bissonnette, G., & Skousen, J. (2001). Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 128(3–4), 283–295. <https://doi.org/10.1023/A:1010336703606>
- Dadban Shahamat, Y., Asgharnia, H., Kalankesh, L. R., & Hosanpour, M. (2018). Data on wastewater treatment plant by using wetland method, Babol, Iran. *Data in Brief*, 16, 1056–1061. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.12.034>
- Effendi, H., Widyatmoko, Utomo, B. A., & Pratiwi, N. T. M. (2020). Ammonia and orthophosphate removal of tilapia cultivation wastewater with *Vetiveria zizanioides*. *Journal of King Saud University - Science*, 32(1), 207–212. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.04.018>
- FAO. (2021). *Base de datos AQUASTAT*. En Sitio web de AQUASTAT. <http://www.fao.org/aquastat/statistics/query/>
- García-Ávila, F., Patiño-Chávez, J., Zhinín-Chimbo, F., Donoso-Moscoso, S., Flores del Pino, L., & Avilés-Añazco, A. (2019). Performance of *Phragmites australis* and *Cyperus papyrus* in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.04.001>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1a ed.). McGraw Hill.
- Hussein, A., & Scholz, M. (2017). Dye wastewater treatment by vertical-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 101, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.016>
- Katakı, S., Chatterjee, S., Vairale, M. G., Dwivedi, S. K., & Gupta, D. K. (2021). Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). *Journal of Environmental Management*, 283, 111986. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111986>
- Khan, N. A., El Morabet, R., Khan, R. A., Ahmed, S., Dhingra, A., Alsubih, M., & Khan, A. R. (2020). Horizontal subsurface flow constructed wetlands coupled with tube settler for hospital wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 267, 110627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110627>
- Khoo, P. S., Ilyas, R. A., Uda, M. N. A., Hassan, S. A., Nordin, A. H., Norfarhana, A. S., Ab Hamid, N. H., Rani, M. S. A., Abral, H., Norrahim, M. N. F., Knight, V. F., Lee, C. L., & Rafiqah, S. A. (2023). Starch-based polymer materials as advanced adsorbents for

- sustainable water treatment: Current status, challenges, and future perspectives. *Polymers*, 15(14), 3114. <https://doi.org/10.3390/polym15143114>
- Koul, B., Yadav, D., Singh, S., Kumar, M., & Song, M. (2022). Insights into the domestic wastewater treatment (DWWT) regimes: A review. *Water*, 14(21), 3542. <https://doi.org/10.3390/w14213542>
- Li, M., Zhu, X., Yang, H., Xie, X., Zhu, Y., Xu, G., Hu, X., Jin, Z., Hu, Y., Hai, Z., & Li, A. (2020). Treatment of potato starch wastewater by dual natural flocculants of chitosan and poly-glutamic acid. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121641. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121641>
- Ñaupas, H., Valdivia, R. M., Palacios, J. J., & Romero, H. E. (2018). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis* (5a ed.). Ediciones de la U.
- Nuamah, L. A., Li, Y., Pu, Y., Nwankwegu, A. S., Haikuo, Z., Norgbey, E., Banahene, P., & Bofah-Buoh, R. (2020). Constructed wetlands, status, progress, and challenges: The need for critical operational reassessment for a cleaner productive ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122340. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122340>
- Organización Mundial de la Salud. (2022, marzo 21). *Saneamiento*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>
- Patel, P., Muteen, A., & Mondal, P. (2019). Treatment of greywater using waste biomass derived activated carbons and integrated sand column. *Science of the Total Environment*, 693, 134586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134586>
- Perbangkhem, T., & Polprasert, C. (2010). Biomass production of papyrus (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater. *Bioresource Technology*, 101(2), 833–835. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.062>
- Retta, B., Coppola, E., Ciniglia, C., & Grilli, E. (2023). Constructed wetlands for wastewater treatment: A review of Italian case studies. *Applied Sciences*, 13(10), 6211. <https://doi.org/10.3390/app13106211>
- Stefanakis, A., Akratos, C., & Tsihrintzis, V. A. (2014). *Vertical flow constructed wetlands: Eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment* (1a ed., Vol. 1). Elsevier.
- Vymazal, J. (2019). Constructed wetlands for wastewater treatment. En B. Fath (Ed.), *Encyclopedia of ecology* (pp. 14–21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11238-2>
- Zela, J., & Olivás, G. (2022). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras*. SUNASS.
- Zidan, A. R. A., El-Gamal, M. M., Rashed, A. A., & El-Hady Eid, M. A. A. (2015). Wastewater treatment in horizontal subsurface flow constructed wetlands using different media (setup stage). *Water Science*, 29(1), 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2015.02.003>